

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PME3380 – Modelagem de Sistemas Dinâmicos



FELIPE TODARO FLEISCHMANN 9795293
MARIANA CLAUDINO PIN 9348664
PAULO MONTIJO BANDEIRA 9348449
VITOR OLAVO TONACO ALEXANDRE 9836176

Modelagem de turbina eólica para análise da influência de variáveis e parâmetros do sistema sobre a potência gerada

Professores:
Agenor de Toledo Fleury
e
Décio Crisol

São Paulo
2020

1 Introdução

1.1 Contexto e Motivação

Segundo TWIDELL; WEIR (2006) “energia renovável é a energia obtida a partir de fluxos de energia naturalmente repetitivos e persistentes que ocorrem no ambiente local”. Partindo disso, as fontes de energia renovável se demonstram cada vez mais importantes e necessárias para garantir um futuro sustentável da geração de energia no planeta.

Há atualmente uma tendência de crescimento na produção de energia renovável no mundo. Entre 2010 e 2018, houve um aumento de 4,2 milhões de GWh para 6,6 milhões de GWh de energia produzida por fontes renováveis mundialmente (IRENA, 2020). Desses 6,6 milhões de GWh, 1,3 milhões de GWh – ou 20% – são na forma de energia eólica, uma das fontes renováveis que mais tem atraído atenção devido à sua abundância, desenvolvimento tecnológico, entre outros fatores (NJIRI; SÖFFKER, 2016). Ainda assim, mesmo com grande potencial de produção local e crescente importância dessa fonte renovável no mundo, o Brasil contribui com apenas com 48,5 mil GWh dos 1,3 milhões de GWh advindos de energia eólica mundialmente (IRENA, 2020). Percebe-se então que a presença de energia eólica no Brasil ainda é tímida, o que permite e incentiva o seu estudo e pesquisa, a fim de aumentar a participação desta fonte de energia na matriz energética brasileira.

Quaisquer fatores que levem à diminuição do custo da energia e seu aumento de eficiência são fundamentais para tornar a energia eólica competitiva como uma fonte alternativa de energia (MANYONGE; MANYALA; ONYANGO; SHICHIKA, 2012). A modelagem de turbinas eólicas permite a simulação e otimização do desempenho dessas turbinas com baixa incorrência em custos (NJIRI; SÖFFKER, 2016). Por consequência, a modelagem de turbinas eólicas apresenta um importante papel na pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia, buscando uma operação mais eficiente e maior produção energética. A partir destes modelos, é possível estabelecer relações entre as variáveis de entrada – tais como ângulo de *pitch* e velocidade das pás – e a potência elétrica gerada, possibilitando assim uma otimização da operação.

1.2 Objetivos

O presente trabalho visa a modelagem dinâmica e a simulação numérica de uma turbina eólica de eixo horizontal com velocidade e ângulo de *pitch* variáveis. A análise tem como objetivo a avaliação da potência elétrica gerada em função dos parâmetros e variáveis de funcionamento do sistema, como altitude de instalação da turbina, a velocidade do vento, o ângulo de *pitch*, e a velocidade do rotor estudando a influência de tais fatores na eficiência da geração de energia.

2 Estado da Arte e Revisão Bibliográfica

Ao longo dos anos, o tema de modelagem dinâmica de turbinas eólicas e do seu efeito sobre as correntes de ar para diversas finalidades vem ganhando força (NJIRI; SÖFFKER, 2016). Dentre temas como efeito wake sobre correntes de ar, estudo de carregamento estrutural, análise de fadiga e controle de potência gerada e de velocidade de rotação (SCHREIBER; BALBAA; BOTTASSO, 2019; NJIRI; SÖFFKER, 2016), a modelagem e controle para otimização da potência gerada é um dos temas de destaque nesse campo de estudos.

KNUDSEN; NYGARD NIELSEN (2005) discutem em seu trabalho a modelagem de turbinas eólicas em sistemas de potência. Apesar de o foco ser a modelagem de turbinas eólicas em si, conceitos básicos de modelagem aerodinâmica e a abordagem da turbina eólica como um componente de um sistema de potência elétrico também são explorados. Em seu trabalho, conceitos como tipo de turbina (i.e. velocidade fixa ou velocidade variável) e velocidade das pás eólicas são explorados com relação ao seu efeito sobre a potência mecânica gerada e sobre o coeficiente de potência.

(MANYONGE; MANYALA; ONYANGO; SHICHIKA, 2012) explora de forma mais detalhada os efeitos da velocidade de ponta do rotor sobre o coeficiente de potência de uma turbina de velocidade variável. Por consequência, efeitos dessa variável sobre a potência total gerada pela turbina também são analisados.

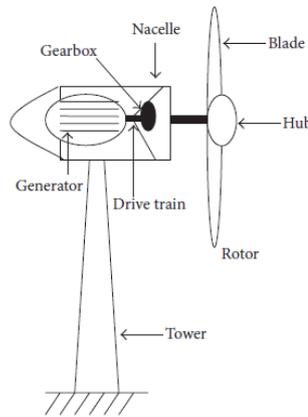
RUBIO; SORIANO; YU; DING (2014) introduzem um modelo mecânico mais completo, considerando a massa das pás e ainda um modelo elétrico específico para o rotor e para o gerador de um protótipo de uma turbina elétrica. O modelo dinâmico obtido simula seis variáveis de estado, duas variáveis de entrada e monitora a saída que é a tensão gerada pela turbina. Os resultados do modelo são validados pelo protótipo construído.

SORIANO; YU; RUBIO (2013) além de mostrar historicamente a evolução de turbinas eólicas, até turbinas com raio de rotor do tamanho da envergadura de um Airbus A380, introduzem ainda mais detalhe e complexidade ao modelo de turbina eólica trabalhado. Conceitos como rigidez e amortecimento devido à adição de uma caixa de engrenagem são introduzidos. Finalmente, diferentes objetivos e formas de controle do modelo proposto são discutidos, como controle linear, não linear, controle do ângulo de pitch entre outros.

A crescente quantidade de artigos publicados explorando a modelagem dinâmica e controle de turbinas eólicas, aliada à maior demanda ambiental por fontes de energia renovável de alta eficiência mostram a importância do tema. Além de atual e relevante, a otimização da potência gerada com base nos modelos desenvolvidos é um grande passo para o desenvolvimento de energias renováveis mais eficientes e uma sociedade mais sustentável.

3 Modelo Físico

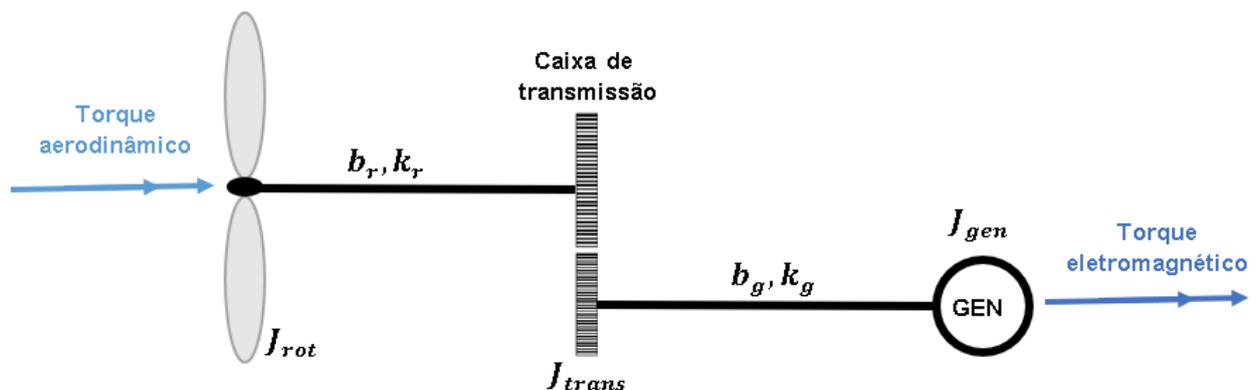
Figura 1: Esquema de uma turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: (ARTURO SORIANO; YU; RUBIO, 2013)

A ilustração do modelo físico é dada na Figura 1. O sistema da turbina eólica pode ser representado como dois sistemas rotativos conectados entre si por uma caixa de transmissão como mostra a Figura 2 (GONZALEZ-LONGATT; REGULSKI; NOVANDA; TERZIJA, 15 out. 2011 - 19 out. 2011; THURY MOSQUEIRA RODRIGUES LOPES, 2016; ARTURO SORIANO; YU; RUBIO, 2013). À esquerda da figura, pode-se observar o rotor que recebe a atuação do torque aerodinâmico realizado pelo vento nas pás da turbina. O movimento do rotor de inércia J_{rot} é então transmitido por um eixo com amortecimentos e elasticidade b_r e k_r , respectivamente. A caixa de transmissão, de inércia J_{trans} , transforma as baixas rotações do rotor da turbina em altas rotações para o eixo conectado ao gerador, que transmite um torque eletromagnético ao gerador de inércia J_{gen} .

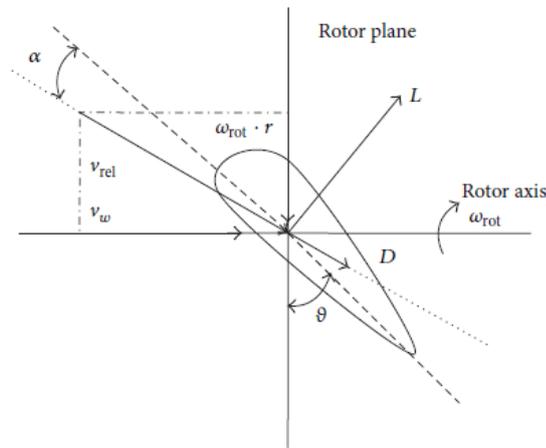
Figura 2: Modelo físico adotado para modelagem da turbina eólica



Fonte: autoria própria com base em (GONZALEZ-LONGATT; REGULSKI; NOVANDA; TERZIJA, 15 out. 2011 - 19 out. 2011; THURY MOSQUEIRA RODRIGUES LOPES, 2016; ARTURO SORIANO; YU; RUBIO, 2013)

Uma ilustração das pás da turbina é mostrada pela Figura 3. A pá é representada por um aerofólio em dois planos perpendiculares entre si, o plano paralelo ao eixo de rotação do rotor e o plano paralelo à velocidade tangencial das pás. Com base neste esquema, podem-se definir dois ângulos aerodinâmicos, o ângulo de ataque α e ângulo de pitch θ . O ângulo de ataque é o ângulo formado entre a velocidade relativa, resultante da atuação da velocidade do vento e da velocidade tangencial das pás, e a corda do aerofólio. O ângulo de pitch é formado entre a corda e o plano paralelo à movimentação das pás.

Figura 3: Diagrama de velocidades e ângulos em plano de uma pá da turbina eólica



Fonte: (ARTURO SORIANO; YU; RUBIO, 2013)

4 Princípios do Modelo Matemático

O modelo físico descrito acima pode ser representado pelas seguintes equações matemáticas, a serem exploradas em detalhe nesse trabalho:

$$J_{rot} \dot{\Omega}_r + k_r(\delta_r - \delta_{ct}) + b_r(\Omega_r - \Omega_{ct}) = T_a$$

$$J_{trans} \dot{\Omega}_{ct} + k_r(\delta_{ct} - \delta_r) + b_r(\Omega_{ct} - \Omega_r) + N_g k_g(N_g \delta_{ct} - \delta_g) + b_g(N_g \Omega_{ct} - \Omega_g) = 0$$

$$J_g \dot{\Omega}_g + k_g(\delta_g - N_g \delta_{ct}) + b_g(\Omega_g - N_g \Omega_{ct}) = -T_{em}$$

Onde:

T_a : Torque aerodinâmico
 T_{em} : Torque eletromagnético
 N_g : relação de transmissão

$\Omega_r(\dot{\delta}_r)$: velocidade angular rotor
 $\Omega_g(\dot{\delta}_g)$: velocidade angular gerador
 $\Omega_{ct}(\dot{\delta}_{ct})$: caixa de transmissão

As equações descrevem um sistema de sexta ordem.

5 Referências

ARTURO SORIANO, Luis; YU, Wen; RUBIO, Jose de Jesus. Modeling and Control of Wind Turbine. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1–13, 2013.

doi:10.1155/2013/982597.

GONZALEZ-LONGATT, Francisco; REGULSKI, Pawel; NOVANDA, Happy; TERZIJA, Vladimir. Effect of the shaft stiffness on the inertial response of the fixed speed wind turbines and its contribution to the system inertia. **2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**. 2011 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Beijing, China. 10/15/2011 - 10/19/2011: IEEE, 15 out. 2011 - 19 out. 2011. ISBN 978-1-4244-9621-1, p. 1170–1175.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Statistics 2020, 2020.

KNUDSEN, Hans; NYGARD NIELSEN, Jørgen. Introduction to the Modelling of Wind Turbines. **Wind Power in Power Systems, Second Edition**, 2005. ISBN 9780470012680, p. 523–554.

MANYONGE, Alfred; MANYALA, Reccab; ONYANGO, Frederick; SHICHIKA, J. Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis. **Applied Mathematical Sciences**, v. 6, p. 4527–4536, 2012.

NJIRI, Jackson G.; SÖFFKER, Dirk. State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 377–393, 2016.

doi:10.1016/j.rser.2016.01.110.

RUBIO, José de Jesús; SORIANO, Luis Arturo; YU, Wen; DING, Feng. Dynamic Model of a Wind Turbine for the Electric Energy Generation. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, p. 409268, 2014. doi:10.1155/2014/409268.

SCHREIBER, Johannes; BALBAA, Amr; BOTTASSO, Carlo. Brief communication: A double Gaussian wake model. **Wind Energy Science Discussions**, 2019. doi:10.5194/wes-2019-52.

SORIANO, Luis; YU, Wen; RUBIO, Jose de Jesus. Modeling and Control of Wind Turbine. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, p. 1–13, 2013. doi:10.1155/2013/982597.

THURY MOSQUEIRA RODRIGUES LOPES, MARINA. **CONCEPÇÃO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA**, 2016. 58 p.

TWIDELL, John.; WEIR, Anthony D. **Renewable energy resources / John Twidell and Tony Weir**. 2. ed.: Taylor & Francis London; New York, 2006. xvi, 601 p. ISBN 0419253300 0419253203.